
О мерах по предупреждению усталостного растрескивания сварных швах узлов врезок технологических трубопроводов газоперерабатывающего завода

**Олег Александрович Павлов (главный специалист),
Александр Анатольевич Моисеев (главный специалист),
Дмитрий Викторович Гуревич (главный специалист)**
ОАО «Системы и технологии обеспечения безопасности. Техдиагностика»
460047, Россия, г. Оренбург, ул. Юных Ленинцев, 22
Тел.: 8(3532) 63-84-07
E-mail: contact@tdiag.ru

В статье рассмотрены причины образования усталостных трещин в сварных швах узлов врезок технологических трубопроводов по результатам исследования поверхностей трещины, образовавшейся в околошовной зоне врезки $\text{Æ}168,3\text{'}7,11$ мм в магистраль $\text{Æ}219,1\text{'}7,04$ мм. Проведена вырезка дефектного участка с последующим проведением неразрушающего контроля, фрактографического и металлографического анализа и определением механических свойств металла элементов узла врезки.

На поверхностях разрушения обнаружены характерные усталостные бороздки, образовавшиеся при ступенчатом развитии трещины. Зарождение трещины произошло на наружной поверхности магистрали в месте сопряжения наплавленного металла сварного шва и основного металла магистрали.

Установлено, что измеренные уровни вибрации в районе врезки превышают допустимые значения, конструкция одного из опорных узлов не соответствует проекту.

Даны рекомендации по предупреждению образования усталостных трещин в подобных конструкциях трубопроводов.

Ключевые слова: трещина, трубопровод, усталость, врезка, исследование, меры.

При эксплуатации технологического трубопровода одной из установок газоперерабатывающего завода, находящегося в эксплуатации более 30 лет, в околошовной зоне сварного шва узла врезки $\text{Ø}168,3\text{x}7,11$ мм в магистраль $\text{Ø}219,1\text{x}7,04$ мм (далее врезка) обнаружена трещина протяженностью 88 мм (рисунок 1).

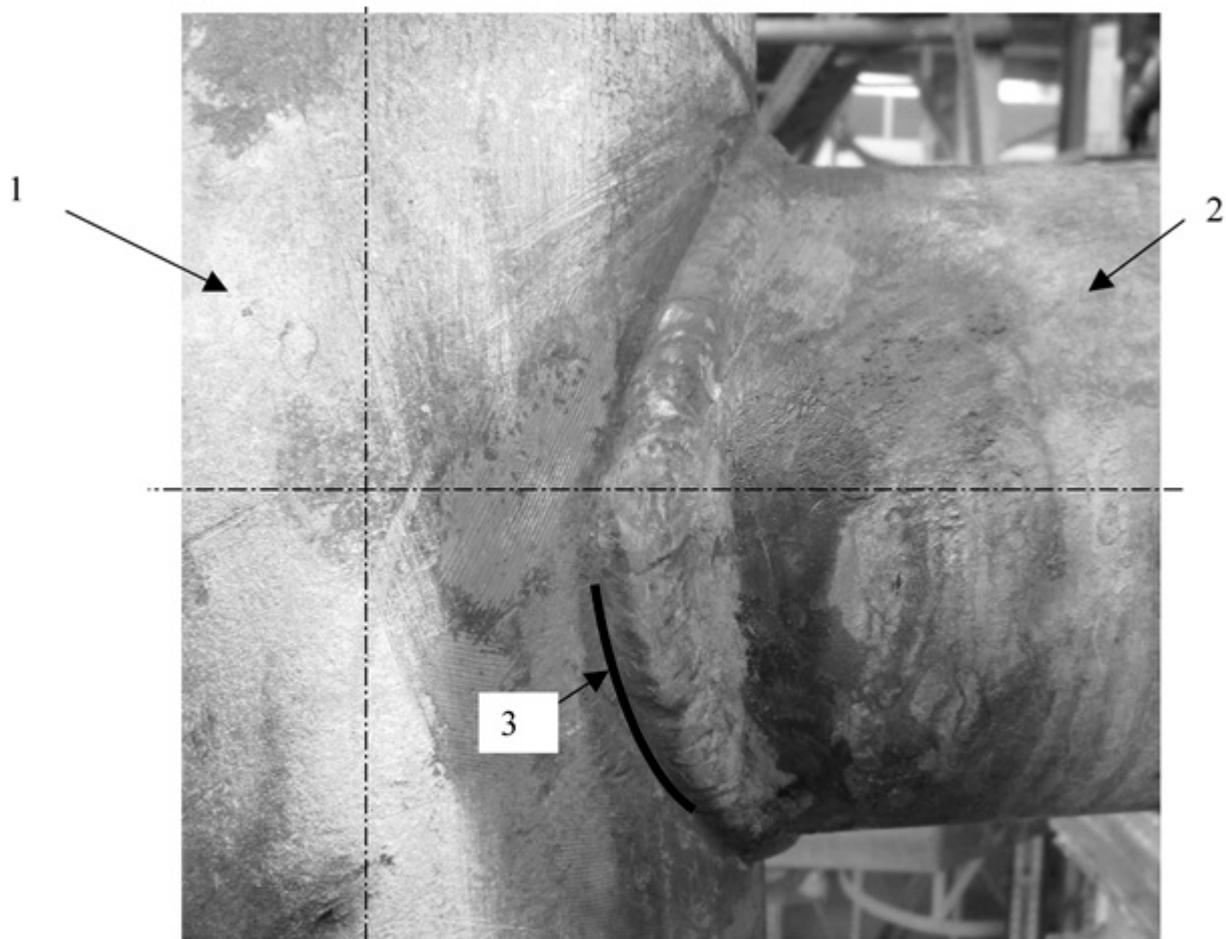


Рисунок 1 – Общий вид врезки с расположением дефекта:

1- магистраль $\varnothing 219,1$ мм; 2 - врезка $\varnothing 168,3$ мм; 3 – трещина.

С целью выяснения причин и характера появления трещины проведен комплекс исследований, включающий проведение визуально-измерительного контроля по [1]-[3], магнитопорошкового контроля по [4], металлографических и фрактографических исследований по [5]-[9], измерение твердости и микротвердости основного металла элементов врезки, зоны термического влияния и сварного шва по [10]-[11].

Для проведения магнитопорошкового контроля с целью обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов (трещины различного происхождения, волосовины, закаты и другие дефекты шириной раскрытия несколько мкм) был вырезан участок магистрали с врезкой.

По результатам магнитопорошкового контроля был обнаружен трещиноподобный дефект протяженностью 88 мм с наружной стороны и 75 мм – с внутренней (рисунок 2).



а)



б)

Рисунок 2 – Проведение магнитопорошкового контроля: а) – с внутренней стороны; б) - с наружной стороны.

Схема вырезки фрагментов врезки для проведения исследования приведена на рисунке 3.

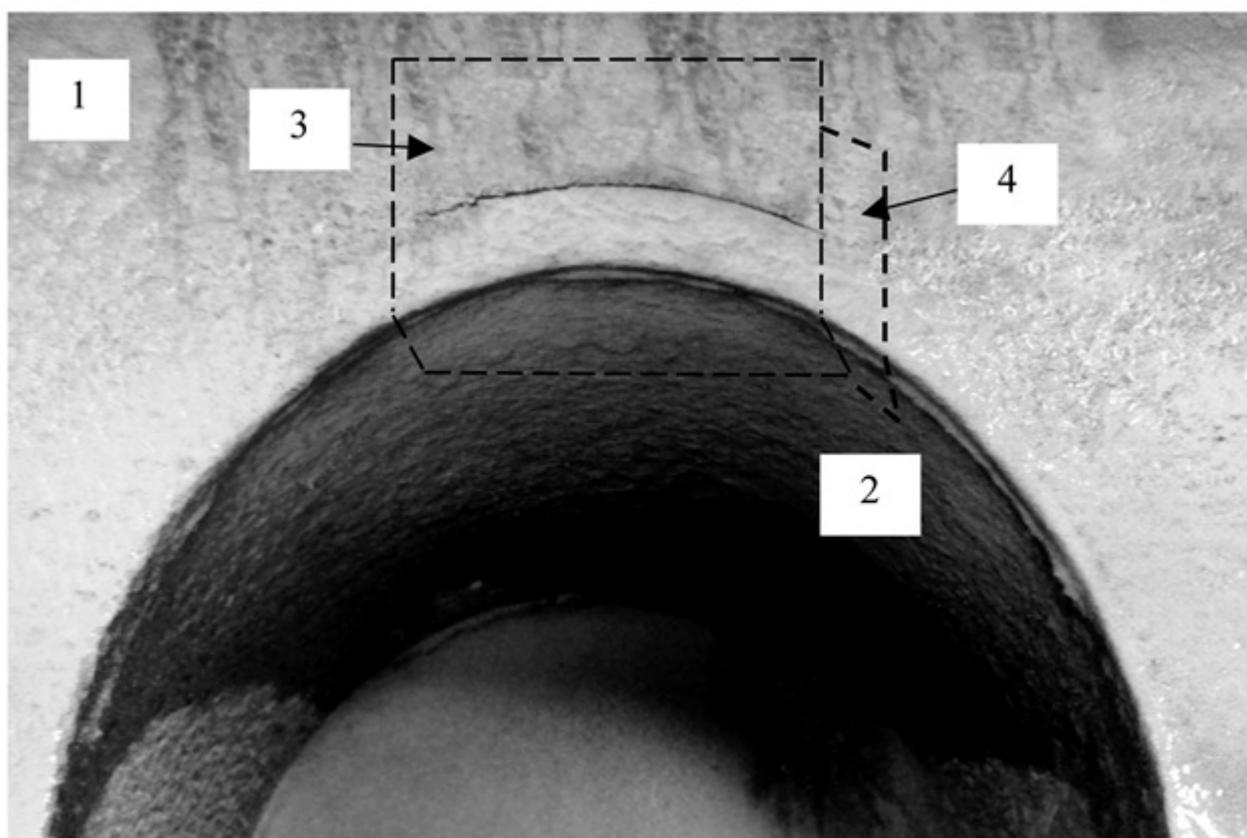


Рисунок 3 – Схема вырезки фрагментов врезки для дальнейших исследований (вид изнутри):

1- магистраль Ø219,1 мм; 2 - врезка Ø168,3 мм; 3 – исследуемый фрагмент врезки; 4 - темплата №1.

Для проведения фрактографического анализа поверхности излома фрагмент врезки разделили по линии трещины на две части (рисунок 4).

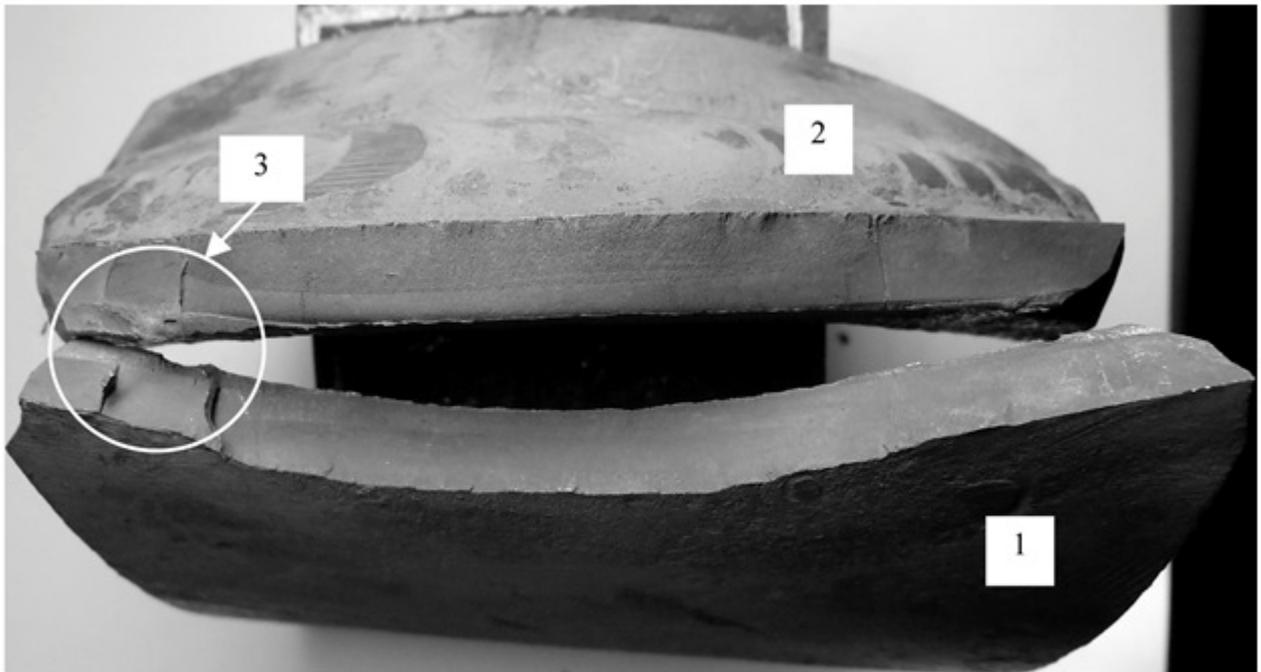


Рисунок 4 – Фрагмент врезки после разделения на две части:

1- магистраль $\varnothing 219,1$ мм; 2 - врезка $\varnothing 168,3$ мм; 3 – зона искусственного долома.

При детальном изучении поверхности излома (рисунок 5) было установлено, что характер разрушения хрупкий, излом зернистый, кристаллический. Волокнистая часть излома незначительна.

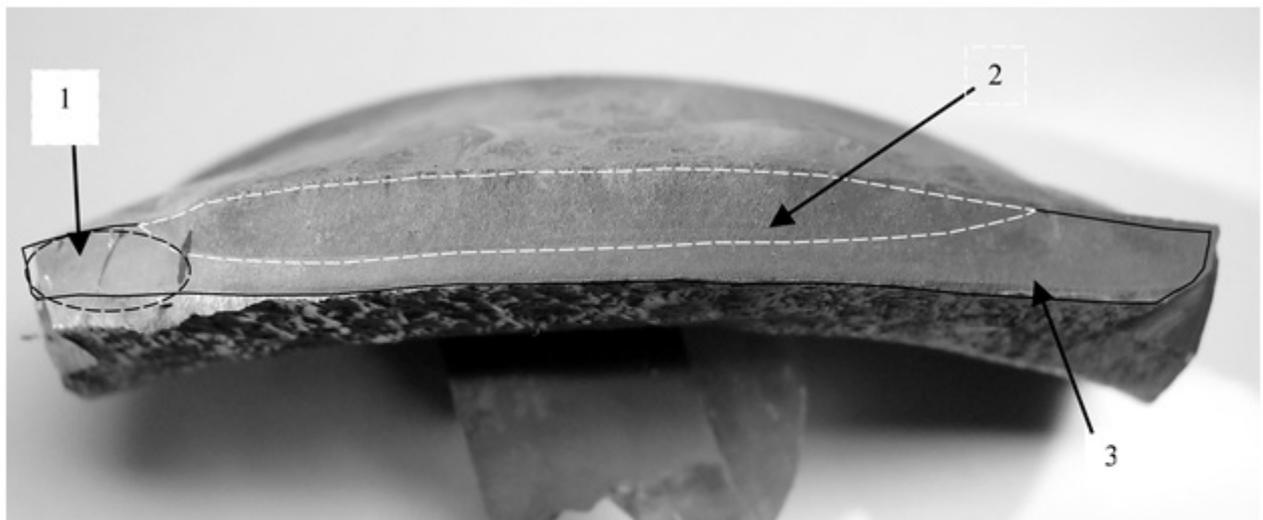


Рисунок 5– Изображение поверхности излома с обозначением характерных зон разрушения: 1 - зона искусственного долома; 2 – зона «А» с усталостными бороздками; 3 – зона «Б» развития трещины.

На поверхностях разрушения имеется несколько характерных зон отличающихся по цвету и структуре металла. С наружной стороны оболочки магистрали вглубь металла распространяется зона темно-бурого цвета с крупнокристаллической структурой на глубину 4 мм (далее зона «А»). Протяженность зоны «А» 65 мм. Зона «Б» характеризуется светло-бурым цветом и мелкокристаллической структурой. Эта зона является зоной развития трещины до сквозного дефекта. Также на поверхности излома имеется зона искусственного долома, которая образовалась вследствие разделения фрагмента врезки вручную.

На поверхности излома в зоне «А» образовались усталостные бороздки, так называемые следы ступенчатого роста (страгивания и остановки) трещины (рисунок 6). Интервалы между бороздками, как правило, увеличиваются по мере роста трещины (явно видно на фрагменте на рисунке 6). Такие бороздки образуются при длительном (ступенчатом) развитии трещины. В соответствии с основами механики усталостного разрушения было установлено, что разрушение металла имеет усталостный характер и имеет начало с поверхности оболочки магистрали.

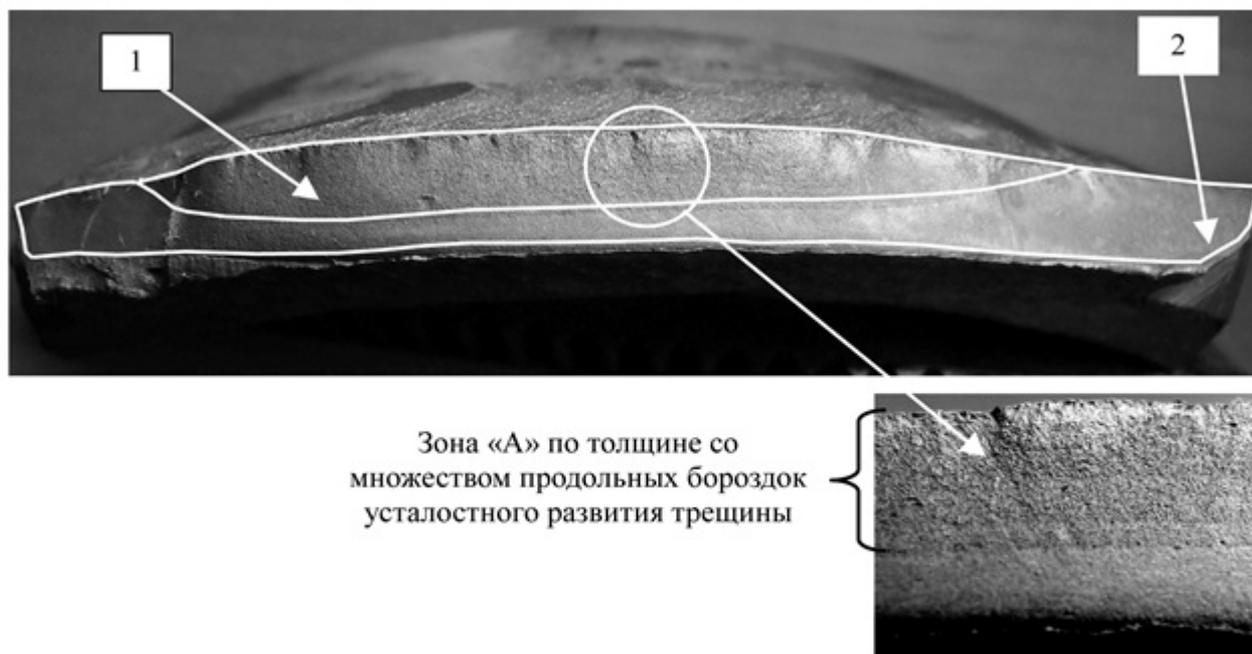


Рисунок 6 – Изображение усталостных бороздок в зоне «А» на поверхности излома металла: 1 – зона «А»; 2 – зона «Б».

Внешний вид темплета №1, вырезанного для проведения металлографических исследований, представлен на рисунке 7.

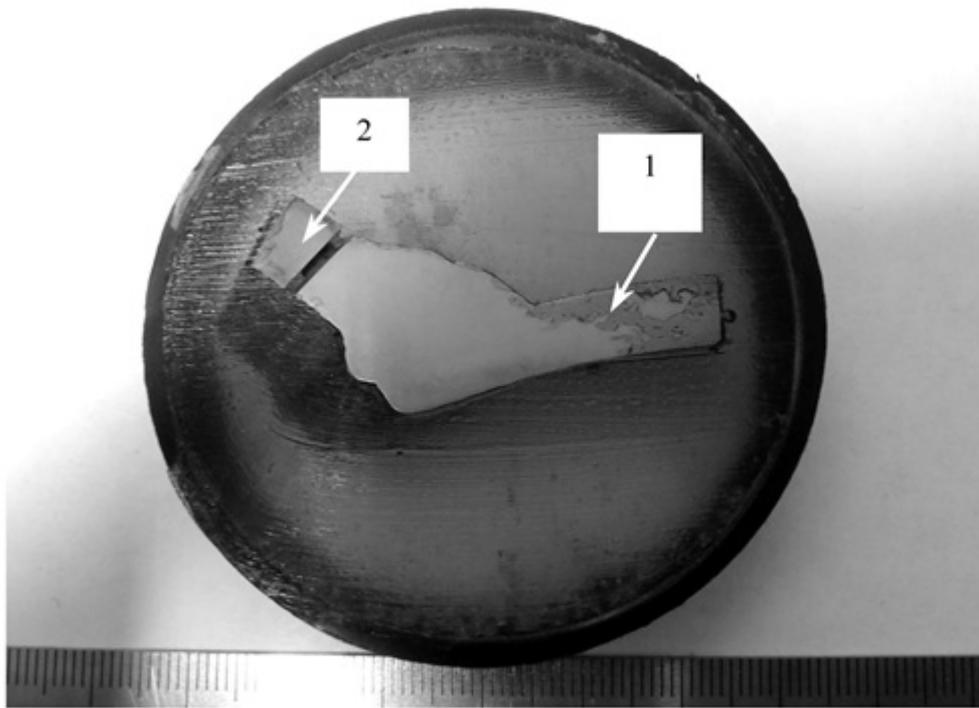


Рисунок 7 – Внешний вид темплета №1 сварного шва узла врезки:

1- магистраль $\text{Ø}219,1$ мм; 2 - врезка $\text{Ø}168,3$ мм

После подготовки шлифа проводилось его травление 3% -ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте с последующим анализом микроструктур. На рисунке 8 хорошо видны границы сварного шва: I- основной металл, II- зона термического влияния (ЗТВ), III- центральная часть сварного шва.

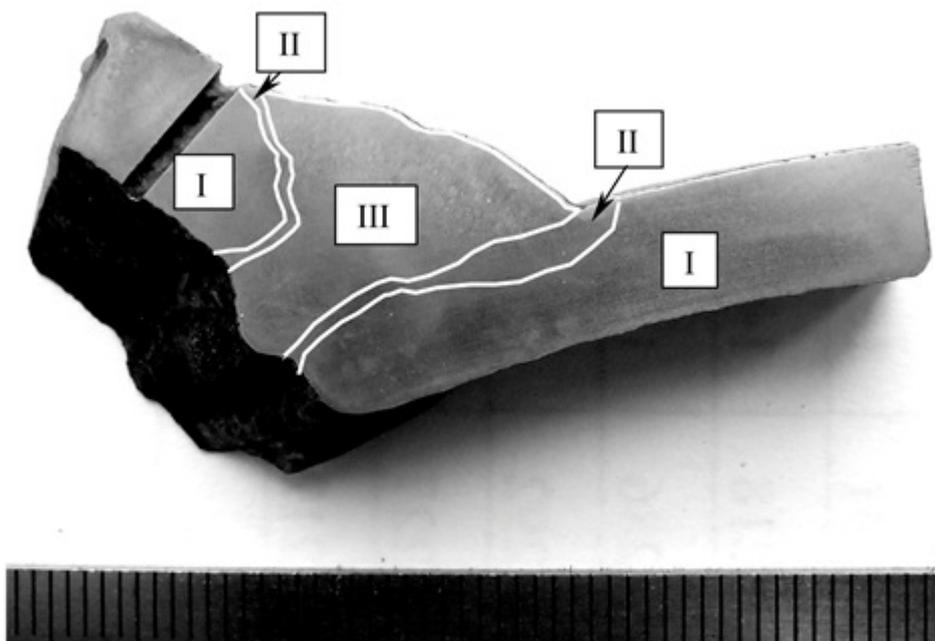


Рисунок 8 – Темплет №1 с обозначением границ сварного шва (после травления):

I- основной металл, II- зона термического влияния (ЗТВ), III- центральная часть сварного шва.

Вершина трещины после травления показана на рисунке 9.

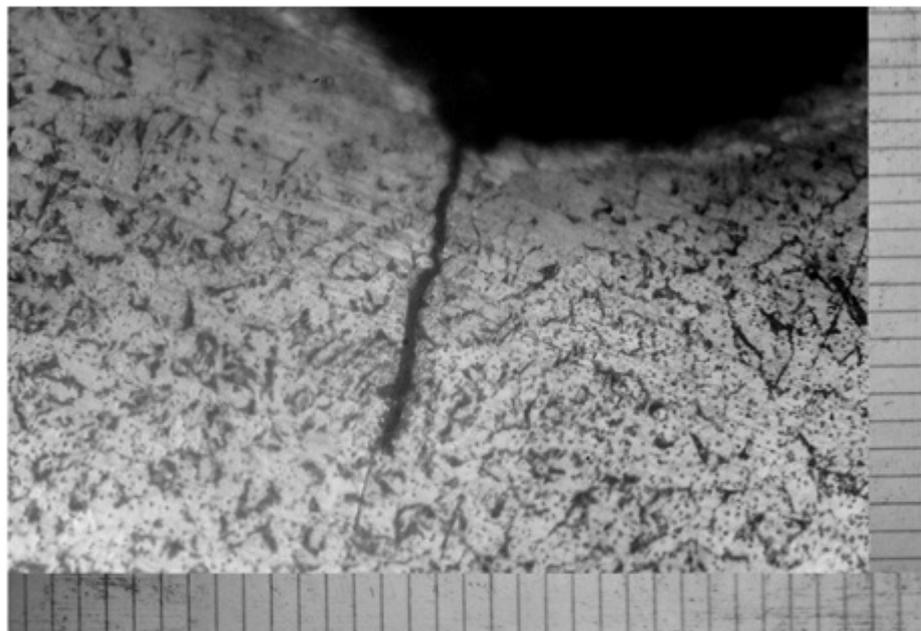


Рисунок 9 – Микрошлиф темплета №1 с вершиной трещины (средняя ширина раскрытия трещины не более 7 мкм); увел. ×400.

По результатам проведенного металлографического анализа определено, что микроструктура основного металла и зон термического влияния представленного фрагмента мелкозернистая феррито-перлитная, балл зерна 10,11, соотношение перлита и феррита оценено 8,9 баллом; микроструктура сварного шва крупнозернистая ферритная, балл зерна 8,9, соотношение перлита и феррита оценено 9 баллом.

Измерение микротвердости проводилось на поверхности микрошлифа темплета №1, расположение точек измерения микротвердости показано на рисунке 10.

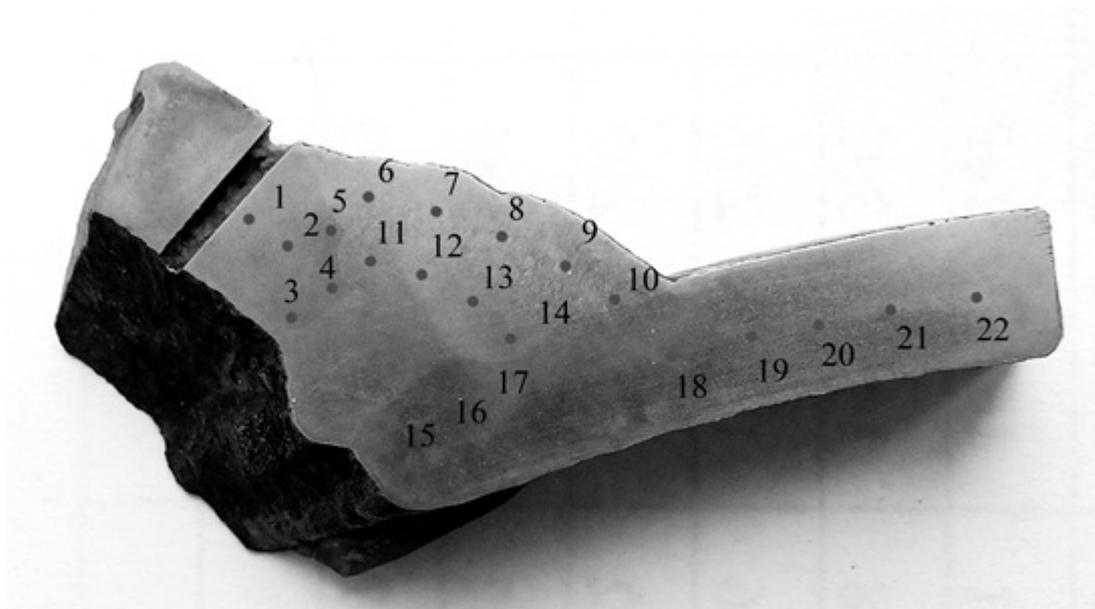


Рисунок 10 - Общий вид микрошлифа с указанием точек измерения микротвердости

Отпечатки №№1,2,18,22 соответствуют основному металлу, №№3,5,15,17 - переходной зоне, №№6,14 - сварному шву.

По результатам измерения микротвердости определено, что микротвердость основного металла составляет 254,266HV_{0,1}; переходной зоны - 221,236HV_{0,1}; сварного шва - 170,185HV_{0,1}.

Схема расположения точек замера твердости представлена на рисунке 11.

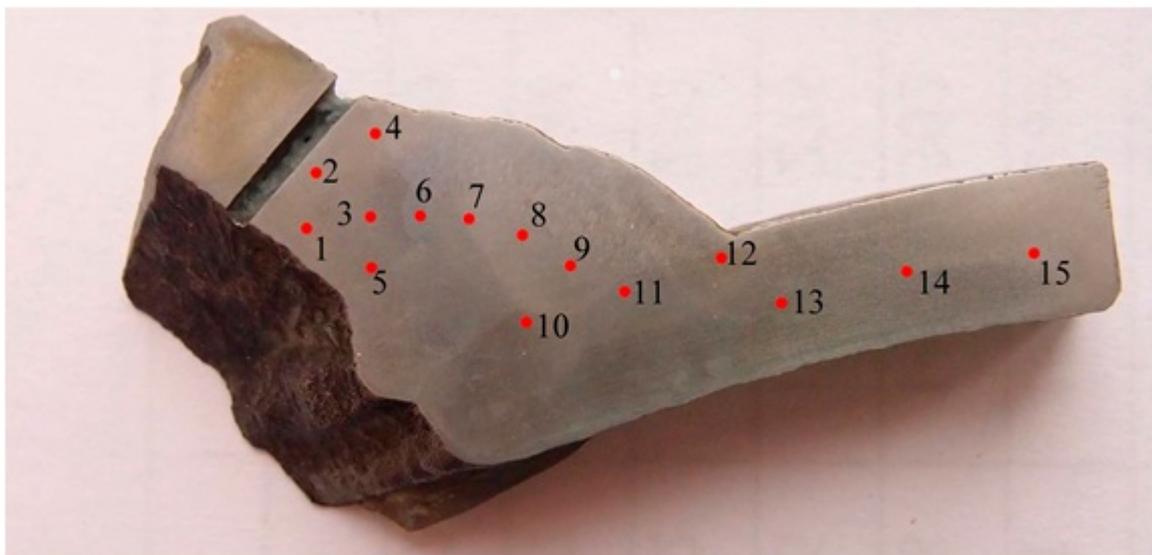


Рисунок 11 – Общий вид темплета №1 с указанием точек измерения твердости.

По результатам измерения твердости определено, что твердость основного металла составляет 149,156НВ; переходной зоны - 161,166НВ; сварного шва - 170,172НВ.

В рамках исследования рассмотрены результаты проведенного ранее вибродиагностического обследования трубопровода.

Допустимые значения амплитуд вибрации согласно [12] представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Опорный уровень	Частота колебаний (Гц)									
	2	4	6	8	10	20	30	40	50	60
1	120	115	100	90	85	60	50	45	40	35
2	250	230	200	180	165	120	95	85	75	70
3	500	450	400	360	330	230	180	145	135	130
4	1250	1100	950	800	750	500	420	350	320	300

Величины измеренных в районе узла врезки уровней вибрации приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Измерение	Амплитуда, мкм	Частота, Гц	Уровень вибрации
Вертикальное	287	7,5	3
Горизонтально-поперечное	105	7,5	2
Осевое	31	10	1

Уровень вибрации технологического трубопровода соответствуют оценке «Трубуемый исправления, реконструкции системы». Также установлено, что существующая опора в районе узла врезки не соответствуют проекту.

Результаты проведенных исследований показали, что:

1. в околошовной зоне узла врезки в металле оболочки магистрали имеется трещиноподобный дефект протяженностью 88 мм с наружной стороны и 75 мм - с внутренней;
2. на поверхностях разрушения имеется несколько характерных зон отличающихся по цвету и структуре металла;
3. на поверхностях излома отчетливо проявляются характерные усталостные бороздки, образовавшиеся при длительном (ступенчатом) развитии трещины;
4. разрушение металла имеет усталостный характер и имеет начало с наружной поверхности оболочки магистрали;
5. микроструктура основного металла трубы мелкозернистая феррито-перлитная, балл 10-11;
6. микроструктура сварного шва крупнозернистая ферритная, балл зерна 8,9;
7. неметаллические включения отсутствуют;
8. ширина раскрытия устья трещины не более 7 мкм;
9. дефекты микроструктуры не выявлены;
10. основной металл имеет твердость 149,156НВ; зона термического влияния имеет твердость 161,166НВ; сварной шов имеет твердость 170,172НВ.
11. уровни вибрации превышают допустимые значения.

На основе анализа результатов проведенных исследований сделаны следующие основные выводы:

1. Образование и развитие трещины произошло в околошовной зоне по основному металлу магистрали в области сопряжения с боковой образующей ответвления.
2. Ориентация трещины: на поверхности магистрали – практически вдоль образующей магистрали по касательной к кромке сварного шва; по толщине – снаружи от кромки сварного шва до внутренней поверхности по основному металлу в радиальном направлении.

-
3. Характер строения поверхностей (берегов) трещины показывает, что трещина является усталостной, зарождение трещины произошло на наружной поверхности магистрали в вершине конструктивного концентратора напряжений – в месте сопряжения наплавленного металла сварного шва и поверхности оболочки магистрали, распространение трещины к внутренней поверхности магистрали до образования сквозной трещины происходило ступенчато, т.е. постепенно.
 4. Ориентация трещины по касательной к кромке сварного шва и, практически, перпендикулярно кольцевым напряжениям в стенке магистрали показывает, что наиболее вероятной причиной ее зарождения и развития явились колебания кольцевых циклических напряжений в стенке магистрали.
 5. Анализ напряженно-деформированного состояния трубопровода показывает, что:
 - наиболее нагруженным участком узла врезки от действия статических нагрузок является область пересечения образующих оболочек магистрали и ответвления с углом сварного соединения 90° (по верхней и нижней образующим ответвления);
 - при фактических измеренных толщинах стенок нормативное условие статической прочности врезки обеспечивается;
 - место возникновения трещины узла врезки не является ее наиболее нагруженным участком от действия статических нагрузок.
 6. Анализ информации о конструкции и условиях эксплуатации показывает, что при демонтаже присоединенных к трубопроводу теплообменников и демонтаже опор трубопровода возникают непроектные нагрузки и воздействия. При исследовании следов и последствий влияния каких-либо непроектных нагрузок и воздействий на узел врезки, могущих привести к имевшему месту усталостному растрескиванию, не выявлено.
 7. Уровень вибрации превышает допустимые значения. Требуется проведение реконструкции существующих опор.

На основе полученных результатов исследований в целях предупреждения подобного растрескивания трубопроводов в дальнейшем рекомендуется в плановом порядке произвести замену аналогичных врезок трубопроводов на тройники и усилить систему конструкции существующих опор трубопровода.

Список литературы

1. ГОСТ 24521-80 «Контроль неразрушающий оптический. Термины и определения».
2. ПНАЭ Г-7-016-89 «Унифицированные методики контроля основных материалов полуфабрикатов, сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Визуальный и измерительный контроль»

-
3. РД 03-606-03 «Инструкция по визуальному и измерительному контролю».
 4. ГОСТ 21105-87 «Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод».
 5. ГОСТ 7564-73 «Сталь. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов механических и технологических испытаний».
 6. ГОСТ 1778-70 «Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений».
 7. ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна», ГОСТ 8233-56 «Сталь. Эталоны микроструктуры».
 8. ГОСТ 10243-75 «Сталь. Метод испытаний и оценки макроструктуры».
 9. ГОСТ 10243-75 «Металлы. Масштабы изображения на фотоснимках при металлографических методах исследования».
 10. ГОСТ 9012-59 «Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю».
 11. ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвёрдости вдавливанием алмазных наконечников».
 12. СА 03-003-07. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов.
 13. СТО Газпром 2-2.3-324-2009 "Диагностическое виброобследование технологических трубопроводов компрессорных цехов с центробежными нагнетателями. Нормы оценки и методы работ".
 14. Фрактография и атлас фрактограмм.
 15. Г.В. Пачурин, А.Н. Гушин, К.Г. Пачурин, Г.В. Пименов. Технология комплексного исследования разрушения деформированных металлов и сплавов в разных условиях нагружения.